

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Б. А. Калашников, В. В. Бохан, К. В. Пеньков

Экспериментальное определение нелинейной функции демпфирования механических систем

Коэффициенты нелинейной функции демпфирования механической системы с одной поступательной степенью свободы определяются по экспериментально полученной осциллограмме свободных колебаний. Функция моделируется тремя видами трения: сухим, линейно-вязким и нелинейно-вязким. Определяются численные значения коэффициентов демпфирования. Получена характеристика диссипативной силы в функции перемещения, по которой находится количество рассеянной за период энергии. Методом энергетического баланса приближённо находится эквивалентный коэффициент относительного затухания, с использованием которого выполняется численное интегрирование уравнения движения. Наложением расчётной осциллограммы на экспериментальную показывается удовлетворительное совпадение огибающей и фазы колебательного процесса. Уточнение параметров функции демпфирования может быть найдено аппроксимацией экспериментальных амплитуд. Найденное значение коэффициента относительного затухания может быть использовано для решения нелинейных задач динамики слабодемпфированных систем.

Ключевые слова: нелинейная функция демпфирования, сухое трение, линейно-вязкое трение, нелинейно-вязкое трение, диссипация энергии, огибающая, коэффициент относительного затухания, метод энергетического баланса.

Ф. Н. Притыкин

Преодоление тупиковых ситуаций синтеза движений антропоморфных роботов на основе использования перемещений оси схватоносителя по линейчатой поверхности, ограничивающей телесный угол сервиса

Предложен алгоритм синтеза движений руки антропоморфных роботов по вектору скоростей при установке объектов манипулирования, заданных в виде прямоугольных призм в контейнер. Алгоритм позволяет осуществлять выход из возникающих тупиковых ситуаций при компьютерном моделировании движений. Суть метода состоит в использовании перемещений руки, при которых ось схватоносителя перемещается и образует с некоторым приближением линейчатую поверхность, задающую телесный угол сервиса. С этой целью предложено использовать базу данных конфигураций, задающих определенные положения центра выходного звена и осей схватоносителя, совпадающих с образующими указанных линейчатых поверхностей. Представлены результаты расчетов промежуточных конфигураций при компьютерном моделировании движения антропоморфных роботов в организованной среде с использованием разработанного алгоритма.

Ключевые слова: механизмы манипуляторов, мгновенные состояния механизмов, вектор обобщенных скоростей, линейчатые поверхности, компьютерное моделирование движений антропоморфных роботов, тупиковые ситуации, запретные зоны, синтез движений манипуляторов.

Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский

Динамический анализ напряженного состояния штока поршня одноступенчатого длинноходового поршневого компрессора

В работе проводится анализ напряженного состояния системы шток поршня — поршень одноступенчатого длинноходового поршневого компрессора. Данные компрессоры применяются для изменения давления сжатого газа от нормального атмосферного давления (760 мм рт. ст. = 0,101 МПа) до давления нагнетания (2–10 МПа). Определены критерии расчета штока поршня с точки зрения его динамики с учетом частоты собственных колебаний штока поршня. Сделаны выводы и приведены практические рекомендации, которые можно использовать в процессе проектирования данных компрессорных ступеней.

Ключевые слова: одноступенчатый длинноходовый поршневой компрессор, потеря устойчивости сжатых стержней, резонанс, критическая сила сжатия Эйлера, политропный процесс, частота свободных колебаний штока, частота вынужденных колебаний штока.

В. А. Ильиных, В. Ю. Линейцев, О. С. Белкина, Е. В. Непомнящих

Оценка напряженно-деформированного состояния профильных соединений узлов машин

В статье представлены результаты исследований профильных соединений механизмов и машин на жесткость и прочность. Устройство выполнено на основе применения неподвижных и подвижных профильных соединений, предназначенных для передачи крутящего момента. Рассмотрены профильные соединения с гарантированным зазором, изготовленные на основе равноосного контура типа РК-3, РК-5 и криволинейного контура типа ККс-4, которые получили наиболее широкое внедрение в узлах металлорежущих станков и других машин, производимых в России, а также в Венгрии, Германии и КНДР. Применяя известную методику, предназначенную для оценки напряженнодеформированного состояния деталей профильных соединений, выполнены расчеты по критериям работоспособности на прочность и жесткость ступиц (втулок) с разной толщиной стенок. Анализ результатов расчета прочности и жесткости проведен на примере РК-3 профиля. При растяжении ступицы от действия распорных сил учтена геометрическая форма, номинальный размер охватываемой детали, толщина стенок охватывающей детали, а также величина передаваемой соединением внешней нагрузки в статике. Определены допустимые значения толщины стенок ступицы (втулок) соединения для обеспечения жесткости ступицы при растяжении от действия внешних нагрузок. В результате исследований установлено влияние толщины стенок ступицы для исследуемых форм деталей соединения от значений передаваемого крутящего момента. Например, изменение толщины стенки ступицы от 15 до 3 мм для нормального ряда посадочных диаметров вала вызывает растяжение втулки в радиальном направлении до 50 мкм в диапазоне передаваемых крутящих моментов от 5 до 600 Н·м.

Ключевые слова: РК-3, РК-5, ККс-4 профильные соединения, вал, ступица, напряжение, растяжение, металлорежущие станки.

Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова

Гармонический анализ крутящего момента двигателя ЯМЗ-5340

Цель исследования заключается в поиске методики и проведении на её основе гармонического анализа крутящего момента двигателя внутреннего сгорания для последующего определения резонансных колебаний коленчатого вала. Приведена методика расчета гармоник крутящего момента двигателя на примере дизельного двигателя ЯМЗ-5340 мощностью 100 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2300 мин⁻¹. На основе результатов теплового и динамического расчета двигателя ЯМЗ-5340 построен график изменения его крутящего момента и произведен расчет гармоник первого и второго порядков. Определены частоты собственных и вынужденных колебаний коленчатого вала и его резонирующая критическая частота вращения. Определён номер гармоники крутящего момента, которая по частоте вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний и вызывает резонанс. Результаты исследования могут быть применены при проектировании и доводке двигателей с целью расчёта и снижения крутильных колебаний.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, крутящий момент, крутильные колебания, гармоника, частота и амплитуда, резонанс.

В. Г. Муфтеев, Ф. Т. Зиганшина, В. И. Гумеров, Р. И. Набиев, Г. М. Ефимова

Качественная модификация геометрически ориентированных методов построения пространственных кривых в C3D FairCurveModeler

В статье приводится подробный алгоритм улучшения команды C3D FairCurveModeler построения пространственной кривой класса F с аппроксимацией посредством рациональной кубической сплайновой кривой (NURBS-кривой) и с аппроксимацией посредством B-сплайновой кривой высокой степени. Улучшение достигается за счёт оптимизации структуры пространственного Геометрического Определителя Эрмита при определении его на пространственной виртуальной

кривой (V-кривой), построенной на множестве K2П (конических кривых) двойного соприкосновения. Структура Геометрического Определителя Эрмита улучшается в операции определения касательной в опорной точке путем переопределения направления касательной с учетом пространственных направлений касательных в концевых точках сегмента K2П при построении множества K2П двойного соприкосновения. Для демонстрации модифицированного метода в работе показывается: 1) улучшение качества конической спирали, моделируемой штатной командой `_Helix` CAD-систем ZWCAD, BricsCAD, AutoCAD с помощью команды `C3D FairCurveModeler` построения NURBS-кривой; 2) построение B-сплайновой кривой 8-й степени на точках конической спирали командой `C3D FairCurveModeler` и сравнение с аналогичными построениями в CAD-системах, 'AliasDesignStudio', NX, декларирующих возможность построения кривых высокого качества (класса A).

Ключевые слова: пространственная сплайновая кривая, `C3D FairCurveModeler`, геометрическое ядро `C3D`, `C3D FairCurveModeler`, K2П, конические кривые, кривые класса A, кривые класса F.

П. А. Хазов, О. И. Ведяйкина

Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания и оценка пешеходной аэродинамической комфортности комплекса зданий

Приводятся и анализируются результаты компьютерного моделирования распределения ветровых потоков вблизи разноплановых объектов — большепролетного и высотного зданий. Анализ пешеходной аэродинамической комфортности проводился для вертикального объекта (высотное здание) отдельно и в комплексе с горизонтальным (большепролетное). Были получены поля распределения ветровых потоков. Результаты эксперимента показывают, что комплексная застройка влияет на их распределение. Изменяется вектор равнодействующей ветровой нагрузки. Меняется скорость и направление распределения ветровых потоков. Близкорасположенные здания либо создают «заслон», снижая скорость ветра, либо способны отражать потоки воздуха, создавая завихрения вблизи объектов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, ветровая нагрузка, пешеходная комфортность, аэродинамическая комфортность, аэродинамические испытания, комплексная застройка, ветровое давление, воздушный поток.

А. С. Коротин, Е. В. Попов

Оценка точности открытых цифровых моделей рельефа местности

Оперативное получение достоверной информации о рельефе местности с достаточной детализацией является одной из главенствующих задач в областях народного хозяйства, развития территорий или исследований крупных территориальных единиц. Множественность источников ошибок в материалах дистанционного зондирования Земли обусловлена рядом факторов, а получаемые модели местности имеют определенную степень генерализации, что напрямую влияет на корректность цифровых моделей рельефа. Данная статья посвящена анализу существующих методов оценки погрешностей открытых цифровых моделей рельефа с целью повышения их точности. Корректные цифровые модели рельефа имеют высокое подобие действительности и могут быть использованы при региональных исследованиях в части определения морфометрических показателей территории.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, древесно-кустарниковая растительность, нормальное распределение Гаусса, интерполяционный полином Лагранжа, локальная интерполяция.

Т. А. Шевелева, А. А. Ляшков

Моделирование границ рабочего пространства планарного трёхзвенного манипулятора

Проведено исследование границ рабочего пространства трехзвенного планарного манипулятора, заданного аналитическими уравнениями. Предложена новая геометрическая трактовка этих уравнений. На ее основе установлено, что рабочее пространство представляет собой двухпараметрические множества эксцентрических и концентрических окружностей. При

отображении таких окружностей в четырехмерное пространство получены два вида гиперповерхностей, которые являются геометрической моделью рабочего пространства манипулятора. Дискриминантами этих гиперповерхностей на гиперплоскости являются две двумерные поверхности. Получены как аналитическое описание этих поверхностей, так и их компьютерные модели. В результате установлено, что границами рабочего пространства на плоскости механизма являются дискриминанты таких поверхностей. Для подтверждения достоверности полученных результатов в качестве примера на дискриминантных поверхностях решена обратная задача кинематики — определены значения обобщенных координат в точках границ рабочего пространства манипулятора для заданных их декартовых координат.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, компьютерная модель, манипулятор, центр схвата, рабочее пространство манипулятора, гиперповерхность, дискриминанта, трехзвенный планарный манипулятор.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. П. Кузьменко

Трехуровневый алгоритм управления напряжением в распределенных электрических сетях с солнечными фотоэлектрическими системами

Современные энергетические системы характеризуются растущей интеграцией возобновляемых источников энергии, что порождает новые задачи в области регулирования напряжения. Целью исследования являлось моделирование процесса регулирования напряжения в контексте распределительных электрических сетей низкого и среднего напряжения (до 35 кВ) с солнечными фотоэлектрическими системами. Разработан трехуровневый алгоритм управления напряжением, который анализирует и объединяет данные о солнечной генерации, определяет оптимальные действия для управления системами хранения энергии, рассчитывает уровни напряжения и определяет необходимые меры по управлению реактивной мощностью инвертора для эффективного уменьшения колебаний напряжения. В исследовании применялись методы математического усреднения временных рядов и оптимизации, основанные на анализе реальных данных. Алгоритм был протестирован на открытом наборе данных генерации энергии солнечной электростанцией. Результаты показывают значительное улучшение показателей регулирования напряжения в пределах нормативов, установленных ГОСТ 32144-2013, что подтверждает эффективность предложенного метода управления напряжением в электрических сетях с солнечными фотоэлектрическими системами.

Ключевые слова: солнечные фотоэлектрические системы, распределенные электрические сети, регулирование напряжения, возобновляемые источники энергии, алгоритмы управления реактивной мощностью, реактивная мощность инвертора.

В. В. Федянин, В. К. Федоров, И. Е. Пестрикова

Генератор хаотических колебаний

В статье проведен анализ существующих схем генераторов хаоса. Проведено численное и имитационное моделирование, направленное на выявление хаотической динамики. На основании известных концепций разработан генератор хаоса и построена имитационная модель. Дано математическое описание генератора и получены фазовые портреты. Представлены диаграммы хаотических колебаний модели Лоренца и модели Колпитца. Рассмотрена работа генератора Ван дер Поля и показаны хаотические процессы, возникающие при внешних гармонических колебаниях. Приведена модель Чуа, дано ее математическое описание и представлен анализ колебаний в режиме детерминированного хаоса.

Ключевые слова: хаос, генераторы хаоса, хаотические колебания, аттрактор, динамическая система, дифференциальные уравнения, фазовый портрет.

Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, К. В. Хацевский, В. Н. Горюнов, В. М. Троценко
Анализ потерь в защищенных и неизолированных проводах в стационарных режимах с учетом погодных условий

В воздушных линиях систем электроснабжения на напряжения 6–110 кВ все большую популярность приобретает использование защищенных проводов, которые обладают целым рядом преимуществ перед традиционными неизолированными алюминиевыми проводами. С другой стороны, наличие изоляции требует разработки более сложных математических моделей для адекватного описания их поведения и исследования характеристик новых проводов при эксплуатации. Приведены результаты использования разработанных математических моделей и программ расчета для сравнительного анализа защищенных и неизолированных проводов в условиях изменения токов нагрузки и погодных условий. Исследованы зависимости температуры и потери активной мощности от толщины изоляции. Показано, что наличие изоляции позволяет при определенных условиях уменьшить температуру и потери по сравнению с проводами без изоляции при прочих равных условиях. Полученные результаты могут быть использованы для повышения пропускной способности и надежности линий электропередач.

Ключевые слова: потери активной мощности, температура проводника, изолированный провод, защищенный провод, активная мощность, воздушные линии, сопротивление линии.

Д. А. Поляков, М. А. Холмов, К. И. Никитин

Исследование влияния магнитного поля на характеристики частичных разрядов

Статья посвящена исследованию зависимостей характеристик частичных разрядов от магнитной индукции. Разработана конструкция экспериментальной установки. Она позволяет прикладывать как высокое напряжение, так и ток, сопоставимый с рабочим. Установка включает в себя источник высокого напряжения (прибор для испытания диэлектриков), схему протекания тока, высоковольтный трансформатор тока и образец кабеля с СПЭ-изоляцией. Работа электрической схемы экспериментальной установки была смоделирована с помощью программного обеспечения. Моделирование показало, что при наличии эксплуатационной электрической прочности изоляции трансформатора тока высоковольтный потенциал не может контактировать с контуром протекания тока. После этого было проведено моделирование магнитного поля внутри изоляционного слоя. На основе разработанной конструкции была создана экспериментальная установка. Для регистрации частичных разрядов в образце кабеля создавался искусственный дефект. Результаты моделирования магнитного поля позволили оценить магнитную индукцию в поле искусственного дефекта кабеля. Далее были проведены экспериментальные исследования по оценке влияния магнитного поля тока жилы кабеля на характеристики частичных разрядов. Результаты измерений показали снижение среднего кажущегося заряда частичных разрядов и мощности частичных разрядов с увеличением тока. Кроме того, сравнивались формы сигналов, но существенных различий не обнаружено. Магнитное поле тока может оказывать влияние на характеристики частичных разрядов в долгосрочной перспективе из-за возможного влияния на направление роста электрической древовидной структуры.

Ключевые слова: частичный разряд, магнитное поле, измерение частичных разрядов, характеристики частичных разрядов, дефект изоляции, экспериментальное исследование, моделирование реальных условий эксплуатации кабеля.

В. М. Троценко, С. С. Гиршин, Е. В. Петрова, В. Н. Горюнов, Д. Г. Сафонов

Моделирование и расчет распределения температуры по длине провода в задачах исследования пропускной способности линий электропередачи вблизи контактных соединений

В статье получено аналитическое решение уравнения теплопроводности для контактного соединения длинных участков воздушных линий, а также рассмотрен случай для линии с двумя короткими и двумя длинными участками, позволяющий учесть распределенные дефекты и размеры зажимов. Показано применение полученной математической модели для определения температуры воздушной линии электропередачи вблизи контактных соединений. Выполнен сравнительный анализ значений температуры в линии электропередачи, рассчитанных по созданной математической модели, с

опубликованными данными, полученными на основе моделирования методом конечных элементов при использовании результатов физического эксперимента. Показано, что нагрев контактных соединений может существенно ограничивать пропускную способность линий даже при допустимом уровне контактных сопротивлений. Это делает актуальными задачи расчета температуры контактных соединений линий электропередачи и уточнения допустимых токов с учетом влияния переходных сопротивлений контактов.

Ключевые слова: осевая передача тепла, контактное соединение, температура, пропускная способность, допустимый ток, контактное сопротивление.

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

С. В. Бирюков

Сравнительное исследование двойного и сдвоенного электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля

В работе проводится сравнительное исследование двойных и сдвоенных датчиков напряженности электрического поля. В сравнении рассматривались конструктивные, технологические и метрологические параметры датчиков, а также сложность их измерительных цепей. Исследования выявили схожесть конструктивных и технологических параметров датчиков и отличие по метрологическим характеристикам и по сложности измерительных цепей. По метрологическим характеристикам сдвоенные датчики значительно превосходят двойные. Установлено, что сдвоенный датчик, имеющий чувствительные элементы с угловыми размерами $\theta_1=46,38^\circ$ и $\theta_2=90^\circ$, обладает меньшей погрешностью от неоднородности поля. Погрешность не превышает $\delta \leq |\pm 2,76| \%$ в пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$. При той же погрешности двойные датчики можно использовать только в ограниченном пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 0,89$. Показано, что сдвоенные датчики по метрологическим параметрам превосходят двойные датчики. Это говорит о целесообразности их использования.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, датчик электрического поля, двойной датчик, сдвоенный датчик, погрешность измерения, расстояние до источника поля.

А. Г. Козлов, Е. А. Фаина

Импеданс проточной измерительной электрохимической ячейки с системой планарных встречно-штыревых микроэлектродов

В статье рассмотрена проточная электрохимическая ячейка с планарными встречно-штыревыми микроэлектродами, предназначенная для импедансных исследований жидких веществ. Для оценки влияния высоты ячейки и геометрических параметров встречно-штыревых микроэлектродов на импеданс ячейки предложен аналитический подход, в котором используется несколько уровней моделирования электрохимических процессов в ячейке. Вначале в структуре ячейки выделяется элементарная двумерная подобласть, для которой определяется распределение потенциала путем решения дифференциального уравнения электропроводности. Используя полученное распределение потенциала, определяются линейные параметры элементарной подобласти, ее линейное сопротивление и линейная емкость, на основе которых находятся сопротивление и емкость системы встречно-штыревых микроэлектродов. Импеданс электрохимической ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами определяется с помощью ее эквивалентной электрической схемы, которая включает сопротивление и емкость системы встречно-штыревых микроэлектродов, емкость двойного электрического слоя на поверхности каждого микроэлектрода и сопротивление выводов встречно-штыревых микроэлектродов. Используя выражение для импеданса электрохимической ячейки, определяются ее диаграммы Найквиста и Боде для различных значений высоты ячейки и геометрических параметров системы встречно-штыревых микроэлектродов (ширины штырей и расстояния между ними). Представленный аналитический подход может найти применение при анализе процессов в проточной электрохимической ячейке с встречно-штыревыми

микроэлектродами, ее проектировании и разработке методического обеспечения для импедансных исследований жидких веществ с ее помощью.

Ключевые слова: электрохимическая ячейка, система встречно-штыревых микроэлектродов, импеданс, эквивалентная электрическая схема, диаграмма Найквиста, диаграмма Боде, модуль импеданса, аргумент импеданса.

В. Е. Митрохин, В. Е. Осипов

Обзор факторов, воздействующих на оптоволоконные линии связи при грозовых разрядах, и моделирование лабораторных установок, предназначенных для изучения влияния магнитного поля на параметры оптоволоконной линии

В статье дается обзор известных эффектов, оказывающих влияние на передачу информации по оптоволоконной линии и возникающих в результате грозовых разрядов: электрооптический эффект Керра, эффект Фарадея, влияние ионизирующих излучений. Указывается на то, что имеются предварительные эмпирические данные, согласно которым магнитное поле изменяет такой параметр оптоволоконной линии, как затухание. С целью проверки указанных предварительных эмпирических данных планируются дальнейшие экспериментальные исследования предполагаемого влияния магнитного поля на затухание, для чего требуется построить лабораторную установку. Сравнению различных вариантов лабораторных установок и предварительному выбору параметра для сравнения также посвящена настоящая статья. В результате моделирования двух вариантов лабораторной установки и сравнения их по принятому параметру выбран один из двух вариантов установки.

Ключевые слова: моделирование, оптоволоконная линия, эффект Фарадея, эффект Керра, магнитное поле, затухание сигнала.

К. И. Фомиченко, Г. В. Волчанин, А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко

Экспериментальные исследования количественного состава продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций

Железобетонные конструкции играют ключевую роль в современной инфраструктуре, однако коррозия арматуры представляет серьёзную угрозу их долговечности и безопасности. В данном исследовании рассмотрена чувствительность портативного рентгенфлуоресцентного анализатора к продуктам коррозии на поверхности бетона. Эксперимент проводился с использованием бетонных образцов, содержащих различное количество гидроксида железа. Результаты показали, что рентгенфлуоресцентный анализатор демонстрирует высокую точность и надёжность в обнаружении коррозии, что способствует улучшению методов диагностики и обслуживания железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, коррозия арматуры, рентгенфлуоресцентный анализатор, диагностика, продукты коррозии, долговечность, инфраструктура.

И. А. Шныптев, Р. С. Курманов, Ю. М. Сосновский, А. А. Кузнецов

Разработка метода определения угла наклона опор контактной сети железнодорожного транспорта

В данной работе рассматривается новый способ измерения и расчета угла наклона (крена) железнодорожной опоры или опоры контактной сети с помощью летящего по прямолинейной траектории беспилотного летательного аппарата, параллельно железнодорожному пути. Проведен обзор существующих методов измерения, указаны их достоинства и недостатки. В рассматриваемом методе предлагается производить измерения углов и расстояний шестью лазерными сканирующими дальномерами, установленными по три штуки на горизонтальной и наклонной плоскостях беспилотного летательного аппарата. Это позволяет повысить быстродействие и точность определения угла наклона вертикально расположенных опор. В расчетах используются минимальные

расстояния от лазерного сканирующего дальномера до верхней и нижней частей поверхности опор. В формулах используются геометрические соотношения и теорема косинусов для вычисления крена опор с учетом их конусности. 3-кратное измерение расстояний и углов позволяет провести по ним усреднение, что значительно повышает точность расчётов. Проведен модельный эксперимент на макете железобетонной опоры контактной сети в четырех ориентациях. Сделано сравнение теоретически рассчитанных и измеренных экспериментально расстояний и углов наклона. Точность определения параметров соответствует нормативным требованиям.

Ключевые слова: опора контактной сети, угол наклона, диагностирование, лазерный сканирующий дальномер, беспилотный летательный аппарат, видеокамера, метод минимальных расстояний, безопасность ж/д транспорта.